

求金属包层平面光波导传播常数的图解法

金恩培

(哈尔滨工业大学物理系 哈尔滨 150001)

摘要 本文提出一种分别得到金属包层平面光波导传播常数实部和虚部的图解法。这种方法直观、准确而且实用。

关键词 金属包层光波导, 传播常数, 图解法

1 引言

由于金属包层光波导具有传输损耗, 因此, 其传播常数应为复值 ($\beta = \beta' - i\beta''$), 而能确定 β 值的本征值方程为复超越方程。这就给求解 β 值带来很多麻烦。多年来, 不少作者寻求了不同求解 β 值的好方法, 如 Kaminow 等人^[1]对 β 值的实部和虚部都写出了近似表达式; Ramadas 等人^[2]采用了谐振峰值法; 余守宪^[3]采用微扰法。而求解过程大多借助于计算机。

为了实际应用的方便, 本文提出一种直接由复超越本征值方程出发, 利用 $\beta'' \ll \beta'$ 的条件, 借助于计算机, 通过作图, 分别求出 β' 和 β'' 。这种方法的优点是, 不用经过任何变换, 物理图象清晰, 方法简单、直观, 精度也较高且具有实际应用价值。

2 方法简述

所考虑的光波导为空气层、介质膜层和金属包层的简单结构, 其复本征值方程为^[4]

$$\tan(\kappa d) = \kappa(\gamma + \theta) / (\kappa^2 - \gamma \cdot \theta), \quad (1)$$

其中 $\gamma^2 = \beta^2 - n_2^2 k_0^2$, $\theta^2 = \beta^2 - n_3^2 k_0^2$, $\kappa^2 = n_1^2 k_0^2 - \beta^2$, n_2, n_1, n_3 分别为空气层、介质膜层和金属包层的折射率, d 为膜层厚度, $k_0 = 2\pi/\lambda$ (λ 为光波长)。通常 γ, θ, κ 皆为复数, n_3 也为复数。复有效折射率 N 应写为

$$N = N' - iN'' = \beta'/k_0 - i\beta''/k_0. \quad (2)$$

将(1)式两边分别表示为

$$F_1(N) = \tan(k_0 d \sqrt{n_1^2 - N^2}), \quad (3)$$

$$F_2(N) = \frac{\sqrt{n_1^2 - N^2} \cdot (\sqrt{N^2 - n_2^2} + \sqrt{N^2 - n_3^2})}{(n_1^2 - N^2) - \sqrt{N^2 - n_2^2} \cdot \sqrt{N^2 - n_3^2}}. \quad (4)$$

对于金属包层波导, 由于 $N'' \ll N'$ ^[4], 这就可以先将 N 取实值(即令 $N \approx N'$), 由 $F_1(N')$ 和 $F_2(N')$ 的实部两曲线的交点求出不同模阶的 N'_m ($m = 0, 1, 2, \dots$)。然后, 将 $N_m =$

1993-12-23 收到, 1994-05-17 定稿

金恩培 男, 1946年生, 副教授, 主要从事光学双稳性和平面光波导方面的研究工作。

$N'_m - iN''_m$ 再代入 $F_1(N)$ 和 $F_2(N)$ 中, 此时, $F_1(N)$ 和 $F_2(N)$ 的实部应当相等, 或者写为 $\text{Re}F_1(N'_m) = \text{Re}F_2(N'_m)$. 若再由作图求出 $\text{Im}F_1(N'_m)$ 和 $\text{Im}F_2(N'_m)$ 两曲线的交点, 又可求出 N''_m 值.

为了估计本方法会给结果带来多大的偏差, 可用下面的实例加以说明.

利用 Kaminow 在参考文献[1]中给出的数据, 以具有较大 N'' 的 Ag 包层波导为例, TE₁ 模的复有效折射率为 $N_1 = N'_1 - iN''_1 = 1.49 - 700 \times 10^{-7}i$, 计算出

$$\begin{aligned} F_1(N'_1) &= -0.988110, \\ F_1(N_1) &= -0.988103 + 0.003745i; \\ F_2(N'_1) &= -0.668630 + 0.002658i, \\ F_2(N_1) &= -0.668631 + 0.002344i. \end{aligned}$$

由上面的数例可见, 当以 N' 代替 N 时, 计算出的 $F_1(N')$ 值与由复值 N 计算出的 $F_1(N)$ 的实部仅在小数点后第五位上有差异; 而对 F_2 来说, 仅在小数点后第六位上有差异. 在参考文献[1]中所列出的几种常用金属包层波导中, Ag 的 N'' 最大. 对于其它几种常用金属包层波导, N'' 都很小. 而 N'' 越小, 本方法的准确度就越高. 例如 Au, 在小数点后第六位上的数值都完全一样. 因此, 用本近似法不会对求解 N' 带来多大的影响. 而对 N'' 的求解过程, 在方法上没有采取近似, 因而结果是可靠的.

3 图解实例

为了说明本图解法的简单易行性, 以参考文献[1]中的 Au 包层波导为例, 求解前三个 TE 模. 对于 Au 包层波导: $n_2 = 1$, $n_1 = 1.5884$, $n_3 = 0.1620 - 3.2103i$, $k_0d = 72$, 为了保证精度, 用计算机求解时, 图 1 中的自变量 N' 的步长可以取小一些. 由计算机画出函数曲线 $F_1(N')$ ($F_1(N') = \text{Re}F_1(N')$) 和 $\text{Re}F_2(N')$, 两曲线交点的横坐标即为不同模阶的 N'_m 值 ($m = 0, 1, 2$). 具体数值列于表 1.

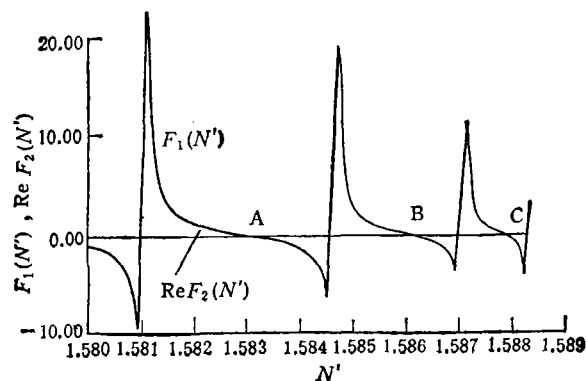
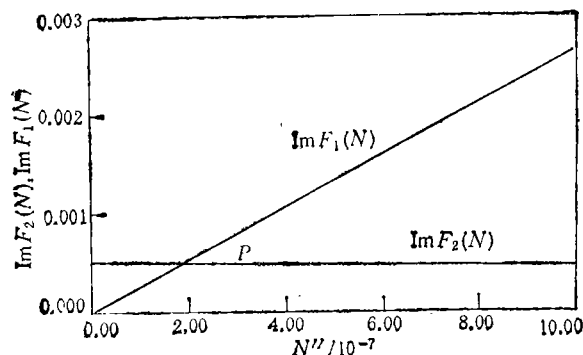


图 1 TE 模 N' 的确定

下面由图解法确定 N''_m . 如图 2 所示, 以 N'' 为自变量, 由计算机画出 $\text{Im}F_1(N'_0 - iN''_0)$ 和 $\text{Im}F_2(N'_0 - iN''_0)$, 两曲线交点的横坐标确定出 N''_0 . 经过同样的过程, 可确定出 N''_1 和 N''_2 , 具体数值均列于表 1 中.

我们还分别求出了 Al、Ag 包层光波导的复有效折射率. 为了便于比较, 将本文提

图2 TE₀ 模 N'' 的确定

出的方法求得的结果与 Kaminow 等人^[1]用解析近似法以及 Ghatak 等人^[4]用精度较高的谐振峰值法计算的某些结果(在参考文献[4]中只给出了 Au 包层光波导的计算结果,没有给出 Ag 和 Al 包层的光波导计算结果)列于表 1 中。

表 1 几种不同方法的比较

| 波导样品 | $k_0 d$ | 模式 | Kaminow 方法 | | Ghatak 方法 | | 本文方法 | |
|------|---------|-----------------|------------|-----------------------|-----------|-----------------------|---------|-----------------------|
| | | | N' | $N''(\times 10^{-7})$ | N | $N''(\times 10^{-7})$ | N' | $N''(\times 10^{-7})$ |
| APAg | 10 | TE ₀ | 1.56 | 150 | | | 1.56294 | 160 |
| | | TE ₁ | 1.49 | 700 | | | 1.48302 | 300 |
| APAu | 72 | TE ₀ | 1.588 | 2 | 1.58781 | 1.8 | 1.58790 | 1.9 |
| | | TE ₁ | 1.585 | 8 | 1.58607 | 7.2 | 1.58609 | 7.1 |
| | | TE ₂ | 1.582 | 18 | | | 1.58307 | 17.0 |
| APAl | 59 | TE ₀ | 1.588 | 7 | | | 1.58756 | 7.3 |
| | | TE ₁ | 1.583 | 30 | | | 1.58492 | 31.0 |
| | | TE ₂ | 1.580 | 70 | | | 1.58072 | 65.0 |

4 结语

由于 Kaminow 等人在计算方法上采取了近似,因此,计算结果的精度稍差。Ghatak 等人采取的方法无近似过程,因此,精度很高。本文采用的方法得到的结果与 Ghatak 等人的结果相近,但 Ghatak 等人给出的实例太少,其它结果也无从比较。从实际应用的角度看,本文的方法更为简单、实用。

参 考 文 献

- [1] Kaminow I P, et al. Applied Optics, 1974, 13(2): 396—405.
- [2] Ramadas M R, et al. Optics Letters, 1989, 14(7): 376—378.
- [3] Shou-Xian She. Optics Letters, 1990, 15(16): 900—902.
- [4] Ghatak A K, et al. Journal of Lightwave Technology, 1987, LT-5(5): 660—667.

GRAPHIC METHOD FOR METAL-CLAD PLANAR OPTICAL WAVEGUIDES

Jin Enpei

(Department of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract A simple graphic method for obtaining the real and imaginary parts of the propagation constant β of metal-clad planar optical waveguides is presented. This method is straightforward, accurate and valuable.

Key words Metal-clad optical waveguides, Propagation constant, Graphic method